

## Caratterizzazione ed indagini in ambito archeologico con GPR e TLS

Vincenzo Barrile (\*), Giuseppe M. Meduri (\*), Giovanni Angiulli (\*\*),  
Domenico De Carlo (\*\*), Tommaso Isernia (\*\*)

(\*) Università degli Studi Mediterranea, MECMAT, Via Graziella Feo di Vito, 89100 Reggio Calabria  
Email: vincenzo.barrile@unirc.it; giumed@libero.it

(\*\*) Università degli Studi Mediterranea- DIMET, Via Graziella Feo di Vito, 89100 Reggio Calabria  
Email: giovanni.angiulli@unirc.it; domenico.decarlo@unirc.it; tommaso.isernia@unirc.it

### Riassunto

Nell'ambito di un progetto interdisciplinare finalizzato alla definizione di un percorso religioso, caratterizzato dall'individuazione e definizione di luoghi di interesse artistico, religioso e storico-culturale, sono state condotte alcune indagini archeologiche, con l'ausilio delle tecniche GPR (*Ground Penetrating Radar*) e TLS (Tecnica Laser Scanner). È ben noto, dalla letteratura scientifica, come entrambe le tecniche siano sempre più utilizzate, col passare degli anni, nel campo delle applicazioni archeologiche, grazie alla capacità di fornire analisi non invasive e caratterizzando peraltro gli oggetti o i luoghi di interesse sia spazialmente (con la TLS) fornendo informazioni sulla morfologia del terreno, sia nella loro struttura interna, indagando all'interno dei materiali (con il GPR). Tuttavia, in ambito GPR, per ottenere informazioni altamente accurate dalle immagini grezze (B-Scan) e di più facile utilizzo e comprensione in ambito archeologico, è spesso necessario migliorarne la loro qualità. In genere, ciò è reso possibile per mezzo dell'ausilio di adeguati trattamenti dell'immagine grezza che vanno sotto il nome di tecniche di focalizzazione. In quest'articolo, sono stati testati diversi approcci di utilizzo delle tecniche; a partire dai dati grezzi acquisiti tramite apparecchiatura georadar, sono state effettuate delle elaborazioni numeriche volte all'applicazione di algoritmi di pre-processamento dell'immagine, per il suo miglioramento, e di focusing sviluppati. Per la TLS sono state effettuate elaborazioni in post processamento e sperimentati algoritmi di *best-fitting* per il riconoscimento di forme.

### Abstract

As part of an interdisciplinary project aimed to defining a religious path, and characterized by the identification and definition of places of artistic, religious and cultural history, some archaeological investigations were conducted, with the help of GPR (Ground Penetrating radar) and TLS (Laser Scanner Technique). It is well known from literature, as both techniques are increasingly used over the years, in applications in archeology, with its ability to provide non-invasive analysis, ground morphology, internal structure, and inquiring within materials (GPR). However, in order to obtain highly accurate information from the raw images (B-Scan) to use in the field of archeology, GPR requires to improve images quality through focusing techniques.

In this paper, several techniques GPR approaches have been used for image pre-processing and focusing. For the TLS were carried out and tested best-fit algorithms processing for the recognition of shapes.

### Introduzione

Il paese di Africo Vecchio, si trova nel cuore dell'Aspromonte Parco Nazionale ad una altitudine di circa 700 m sopra il livello del mare e fondato nel IX secolo dC. La comunità è stata abbandonata dopo l'alluvione del 1951 (D'Agostino, 2005) e spostata insieme a Casalnuovo lungo la costa Jonica, con il nome di Africo. Nei pressi di Africo Vecchio si trova la chiesa bizantina di S. Leo, alle spalle della quale si suppone possano trovarsi i resti di un antico monastero e/o antiche cisterne sotterranee per la raccolta di acqua. Le indagini con laser scanner e georadar hanno avuto lo scopo di ricostruire la morfologia del terreno ricreandone il modello tridimensionale e di individuare quali zone potessero essere oggetto di eventuali futuri scavi.

### Rilievo con TLS

L'acquisizione dei dati nella porzione di terreno oggetto di indagine, è stata realizzata con lo strumento Riegl LMS-Z420i con l'effettuazione di due posizioni strumentali e senza l'utilizzo di *targets*, non necessari per il tipo di elaborazione effettuata. Per la successiva operazione di registrazione delle scansioni, infatti, è stato utilizzato l'algoritmo ICP (*Interactive closest Point*) (Chen, Medioni, 1992 - Rusinkiewicz, Levoy 2001), implementato in ambiente *Matlab* che ha permesso, senza l'ausilio di *targets* di appoggio, di generare una unica nuvola di punti rappresentativa dell'oggetto indagato.

L'algoritmo ICP applica in modo iterativo una roto-traslazione rigida nello spazio ad una delle due nuvole, considerata mobile, affinché si sovrapponga nel miglior modo possibile all'altra nuvola, considerata fissa.

In un'iterazione, ICP assume che i punti più vicini siano corrispondenti, calcola l'orientazione assoluta e applica la trasformazione ottenuta rigida a  $V^j$ . In pratica allo *step 1* per ogni punto della nuvola mobile (insieme  $V^j$ ), vengono ricercati, all'interno della nuvola fissa, i punti (*closest point*) contenuti all'interno di una sfera di un certo raggio (multiplo di un parametro introdotto dall'utente) appartenente all'insieme  $V^i$  e di questi viene tenuto il più vicino, che sarà considerato il punto corrispondente. Allo *step 2*, con tali corrispondenze trovate, l'algoritmo calcola la trasformazione incrementale ( $R_{i,j}$  matrice di rotazione e  $T$  vettore di traslazione e risolvendo l'orientazione assoluta) applicandola agli elementi di  $V_j$ ; Se la media dell'errore quadratico è minore di una certa soglia, l'iterazione termina altrimenti torna allo *step 1*;

Il principio su cui si basa tale algoritmo è che l'allineamento tra le due nuvole di punti corrisponde alla minimizzazione degli errori quadratici delle istanze minime tra i due oggetti, in quanto, l'algoritmo converge a un minimo locale dell'errore (Besl, McKay, 1992):

$$\sigma = \sum_{i=1}^N \|x_i - (R_{x_i} - T)\|^2 = \min$$

$$C: V^j \rightarrow V^i / \forall y \in V^i \exists x \text{ tale che } \min_{\text{distanza}(y,x)} < \sigma$$

Il modello tridimensionale così ottenuta, è stato successivamente elaborato con un algoritmo di *Texture Mapping* che ha consentito di "spalmare" sulla nuvola di punti l'immagine fotografica producendo così un modello 3D realistico Figura (1)



Figura 1. Nuvola di punti intera dopo la registrazione.

La successiva fase di filtraggio ha comportato in prima istanza la rimozione degli errori grossolani e successivamente, l'individuazione dei punti appartenenti al terreno e la rimozione di quelli ad esso estranei (vegetazione, edifici...). In tale fase tuttavia si è scelto di non eliminare i punti appartenenti alla chiesa di S. Leo in modo da utilizzarla, sia come riferimento nella modellizzazione, sia nella sperimentazione degli algoritmi di *best-fitting*.

A tal riguardo, è stato testato un algoritmo di *best-fitting* (variando impostazioni e parametri) il quale, tramite operazioni di triangolazione sulla nuvola di punti e converte i punti acquisiti dal laser scanner in una rappresentazione superficiale tramite una funzione  $Z = f(x,y)$  che, per una prefissato *range* di grandezza dell'errore e in virtù di informazioni di vicinanza ed adattamento, descrive e approssima la curvatura della superficie.

In particolare, è stata utilizzata la funzione di interpolazione locale  $z = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey$  (Bhimji, 2005) a 5 coefficienti, determinati con metodo di minimi quadrati.

La fase di *mesh* infine modella il tipo di geometria specificato e trasforma il set di punti grezzi 3D in una superficie continua.

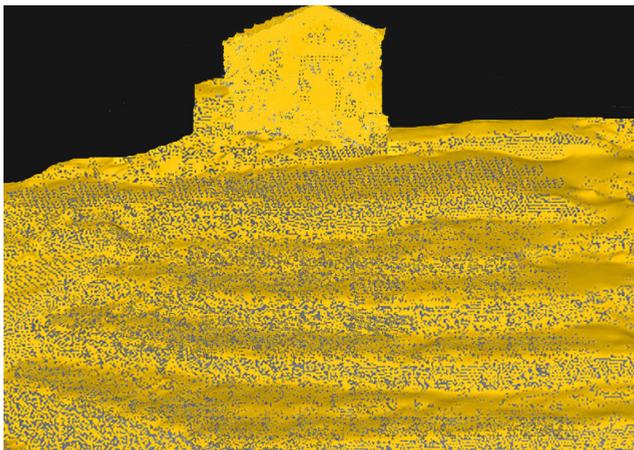


Figura 2. Nuvola di punti intera dopo la registrazione.

### Cenni sui Metodi di Focalizzazione in ambito GPR

In una sezione B-scan grezza, ottenuta attraverso una normale campagna di rilievo con GPR monostatico, un oggetto sepolto può apparire sotto forma di una traccia iperbolica. Con il termine *Wave Focusing* (o migrazione) si intende un insieme di metodi in grado di migliorare la qualità dei B-scan, mitigando gli effetti che danno luogo a iperboli, in modo che, nei risultati, la forma elaborata e visualizzata degli oggetti si avvicinino maggiormente alla loro dimensione fisica reale dando, inoltre, una collocazione spaziale più accurata (Daniels 2004, – Turk, 2011 e riferimenti all'interno). A seguire, un breve resoconto sulle tecniche di focusing utilizzate per questo articolo.

### Diffraction Summation

Quando un GPR monostatico si muove su una linea di scansione lungo l'asse  $y$ , un oggetto sepolto situato nel punto di coordinate  $(y_\alpha, z_\alpha)$ , dà luogo ad una traccia iperbolica visualizzata in un B-scan, descritta dalla seguente equazione:

$$R_\alpha = \sqrt{z_\alpha^2 + (y_\alpha - y_\beta)^2} \quad [1]$$

dove  $R_\alpha$  è la distanza tra la posizione di misura ( $y_\beta, z = 0$ ) e le coordinate dell'oggetto scatteratore sepolto ( $y_\alpha, z_\alpha$ ). La tecnica *Diffraction Summation* è l'approccio più semplice per il *focusing* della traccia rappresentante il bersaglio (Daniels, 2004 – Turk, 2011). Si opera come segue: se  $\Psi$  è il campo scalare rappresentativo dei dati raccolti lungo la linea di scansione  $y$ , il campo scalare focalizzato  $\Psi_f$  può essere ottenuta come somma di ciascun punto, all'interno del B-scan grezzo, lungo la curva iperbolica di diffrazione definita dalla [1]:

$$\Psi_f(y_\alpha, z_\alpha) = \sum_\beta \Psi\left(y_\beta, t = \frac{R_\alpha}{v_e}\right) \quad [2]$$

dove  $v_e = v_f/2$  è la velocità delle onde nel mezzo ottenuta sfruttando modello “*exploding source*” (Turk, 2011). Se le proprietà elettromagnetiche del terreno in cui è sepolto l'oggetto variano lentamente, può essere utilizzato un'unica velocità  $v_e$  per tutta l'estensione in profondità (cioè il mezzo può essere considerato omogeneo) (Turk, 2011).

### Kirchhoff migration

Il metodo di *migrazione Kirchhoff* si basa sullo stesso principio caratterizzante il *Diffraction Summation* differenziandosi, però, per il trattamento dei "dati grezzi"  $\Psi$  raccolti durante la scansione attraverso l'introduzione di alcuni fattori di correzione. Il campo scalare focalizzato  $\Psi_f$  può essere descritto (in forma discreta) come (Daniels 2004, – Turk, 2011 e riferimenti all'interno):

$$\Psi_f(y_\alpha, z_\alpha) = \frac{1}{2\pi v_e} \sum_\beta \Psi\left(y_\beta, \frac{R_\alpha}{v_e}\right) \frac{\cos(\theta)}{R_\alpha} \quad [3]$$

dove le termine  $\cos(\theta)$ , chiamato “obliquità” (Turk, 2011), tiene conto del fatto che la normale al fronte d'onda non è parallelo alla normale della linea di scansione di misurazione ed il termine  $1/R_\alpha$ , Denominato “*spreading factor*” (Turk, 2011), rappresenta le perdite di propagazione delle onde nel terreno.

### F-K migration

La *migrazione FK* (o migrazione di Stolt) può essere considerata come una variante del metodo *Phase Shift*, valida soltanto per un valore costante di  $v_e$ . Si può dimostrare che l'espressione di  $\Psi_f$  può essere valutata tramite trasformata inversa di Fourier come

$$\Psi_f(y, z) = \iint \Psi(k_y, \omega) e^{j(k_z(\omega)z + k_y y)} dk_y d\omega \quad [4]$$

dove  $k_y$  e  $k_z$  sono i numeri d'onda,  $\omega$  è la pulsazione angolare e  $\Psi(k_y, \omega)$  è la trasformata di Fourier di  $\Psi(y, t)$ . Tenuto conto che il numero d'onda  $k_z$  è data da

$$k_z = \sqrt{\left(\frac{\omega}{v_e}\right)^2 - k_y^2} \quad [5]$$

Di conseguenza, la [4] diventa:

$$\Psi_f(y, z) = v_e^2 \iint \frac{k_z}{\omega} \Psi(k_y, \omega) e^{j(k_z y + k_z z)} dk_y dk_z \quad [6]$$

La relazione [6] è computazionalmente significativa: permette di ottenere il focusing dati  $\Psi_f(y, z)$  semplicemente come la trasformata inversa di Fourier del prodotto tra  $k_z / \omega$  e la trasformata di Fourier bidimensionale  $\Psi$  dei dati grezzi (Daniels 2004, – Turk, 2011 e riferimenti all'interno).

### SAR migration

La tecnica di migrazione SAR può essere derivata considerando uno scenario in cui sono sepolti  $N$  scatteratori, ciascuno con riflettività  $\rho_\alpha$  e coordinate  $(y_\alpha, z_\alpha)$  (per  $\alpha \in \{1, \dots, N\}$ ) (Daniels 2004, – Turk, 2011 e riferimenti all'interno). Di conseguenza,  $\Psi(y, t)$  può essere modellata come

$$\Psi_f(y, t) = \sum_{\alpha=1}^{\alpha=N} \rho_\alpha \exp\left(-j \frac{\omega}{v_e} \sqrt{z_\alpha^2 + (y_\alpha - y)^2}\right) \quad [7]$$

Se si considera la trasformata di Fourier della [7] e viene applicato il metodo di fase stazionaria, si può dimostrare che la relazione [7] è esprimibile nel seguente modo

$$\Psi(k_y, k_z) = P(\omega) \sum_{\alpha=1}^{\alpha=N} \rho_\alpha \exp(-jz_\alpha k_z + jy_\alpha k_y) \quad [8]$$

dove  $P(\omega)$  è la trasformata di Fourier dell'impulso GPR e  $k_z$  è fornito dalla relazione [5] (Turk, 2011). Se l'immagine GPR focalizzata  $\Psi_f(y, z)$  è assunta come

$$\Psi_f = \sum_{\alpha} \rho_\alpha \delta(y - y_\alpha, z - z_\alpha) \quad [9]$$

Si ottiene:

$$\Psi_f = \iint \frac{\Psi(k_y, \omega(k_z))}{P(\omega(k_z))} \exp(-jk_y y + jk_z z) dk_y dk_z \quad [10]$$

Una valutazione accurata della [10] con una FFT (*Fast Fourier Transform*) richiede punti equidistanti nel dominio  $(k_y, k_z)$ , che comportano un problema (Daniels 2004, – Turk, 2011 e riferimenti all'interno).

### Rilievo con GPR

Le indagini sono state effettuate utilizzando l'apparecchiatura GPR IDS RIS-K2 prodotto da Ingegneria Dei Sistemi SpA, dotato di antenna 200 MHz. I profili sono stati acquisiti in modalità continua. La finestra temporale di acquisizione è stata fissata a 250 ns e il tempo di campionamento a 0,5 ns. I dati GPR sono stati memorizzati, durante la campagna di rilievi, nel formato *.dt* su apposito notebook di supporto. Tutte le operazioni di indagine sono state effettuate in un giorno da una coppia di operatori. I dati sono stati elaborati off-line.

La sequenza di elaborazione, successivamente elencata, è stata adottata prima di effettuare il trattamento di messa a fuoco: *i)* primo allineamento temporale, *ii)* *dewow*, *iii)* rimozione del *background*, *iv)* *time gain* (Daniels, 2004, Masini et. al, 2011 e riferimenti all'interno). Tutte le routine di elaborazione sono state implementate in ambiente *MatLab* 2008b ed eseguite su un PC di supporto all'attrezzatura a 64 bit Intel Core 2 Duo 1,66 GHz 2 MB di cache L2 e 4 GB ECC full-buffered DDR2 RAM.



Figura 3. Indagine GPR.

L'indagine nella zona adiacente la chiesa di San Leo Figura (3) è stata svolta su una superficie di circa 66 mq con un grigliato rettangolare. Sono stati acquisiti 37 profili 11,5 m di lunghezza, equidistanti tra loro 0,31 m, lungo direzione x, e 18 profili di 5,5 m di lunghezza, equidistanti tra loro, 0,3 m lungo la direzione y. La parte a sinistra della Figura (4) riporta il B-scan relativamente ad un profilo GPR (ritenuto tra i più significativi della campagna indagini). Si può osservare una zona ampia e profonda che parte dal tempo di circa 30 ns e scende verso il basso dell'immagine. Al tempo di circa 10 ns, in questo radargramma, sono identificabili (anche se non perfettamente) diverse iperboli di diffrazione.

La velocità delle onde elettromagnetiche nel suolo è stata valutata analizzando la forma di questa iperbole ottenendo un valore di 6,7 centimetri nsec-1. Nella parte a destra della figura (4) e nella figura (5) sono mostrate le immagini ottenute sfruttando, rispettivamente, le tecniche di: *Diffraction Summation*, la migrazione di Kirchhoff e la migrazione F-K. Il risultato dell' algoritmo SAR algoritmo non è stato mostrato in quanto molto simile a quello previsto dal metodo F-K.

Dai risultati ottenuti, emerge che la tecnica F-K si concentra sulle tracce rappresentative le iperboli in maniera leggermente migliore rispetto agli altri algoritmi. In effetti, l'immagine non mostra "iperboli fantasma", che sembrano verificarsi in tutti gli altri casi (un'anomalia di questo tipo potrebbe essere interpretata come una cavità). In tabella I, sono riportati i tempi di esecuzione dei metodi sfruttati.

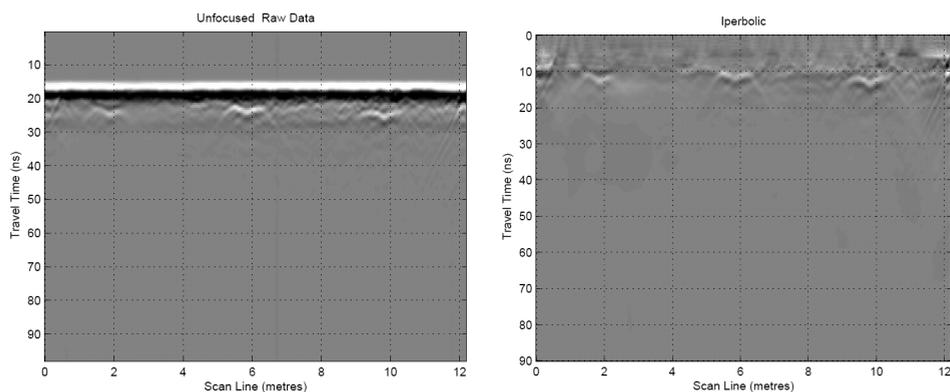


Figura 4. B-scan grezzo (Profilo GPR). e B-scan focalizzato usando l'algoritmo *Diffraction Summation*.

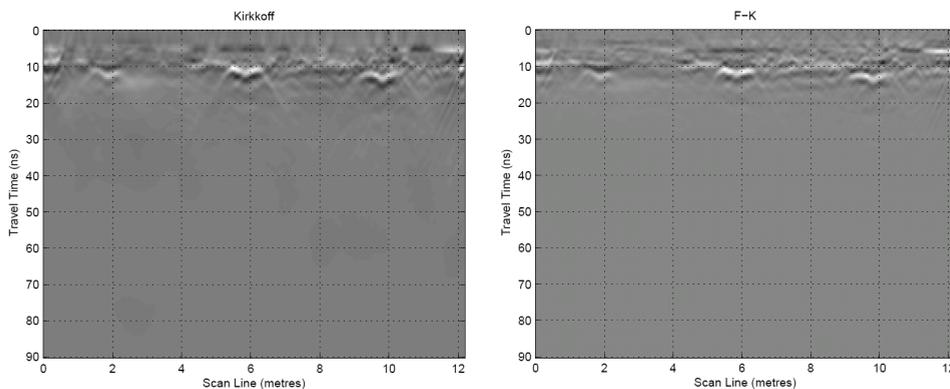


Figura 5. B-scan focalizzato usando l'algoritmo di Kirchhoff e B-scan focalizzato usando l'algoritmo F-K.

Metodo	Profilo GPR
Hyperbolic Summation	13.28 sec
Kirchhoff Migration	89.87 sec
F-K migration	2.67 sec
SAR focusing	2.92 sec

Tabella 1. Confronto dei tempi di esecuzione degli algoritmi di focusing utilizzati.

## Conclusioni

In questo lavoro sono stati riportati i risultati preliminari circa la valorizzazione delle diverse strategie per mettere a fuoco le immagini GPR raccolte nei siti d'indagine situati nel territorio della città abbandonata di Africo Vecchio. Prima del processo di *focusing* dei dati grezzi, quest'ultimi sono stati pretrattati seguendo un approccio standard. Gli esempi considerati in questo studio sembrano indicare la superiorità dell'algoritmo FK rispetto alle altre tecniche utilizzate.

Da come si evince in tabella 1, l'algoritmo FK è caratterizzata da un onere computazionale inferiore rispetto agli altri metodi applicati e questa è una caratteristica importante per applicazioni che lavorano in tempo reale. I risultati complessivi effettuati durante le indagini sembrano escludere la presenza di cripte sotterranee, ma indicano la presenza di anomalie che richiedono ulteriori indagini con una antenna di frequenza più alta. Tali indagini verranno svolte in un periodo successivo all'elaborazione di quest'articolo.

Per quanto concerne le elaborazioni laser scanner, l'utilizzo dell'algoritmo di *best-fitting* testato, ha fornito risultati apprezzabili. Tuttavia, la sperimentazione si è dimostrata particolarmente lunga e difficoltosa sia nella scelta delle impostazioni e parametri ottimali, sia per via della presenza di zone d'ombra su quanto rilevato, con la conseguente presenza di disuniformità che ha comportato la necessità di applicare più volte l'algoritmo a zone ristrette.

## Bibliografia

- Masini N, Persico R, Rizzo E. (2012), "Some Examples of GPR Prospecting for Monitoring of the Monumental Heritage", *Journal of Geophysics and Engineering*, vol.7, pp.190–199.
- Turk A. S, Hocaoglu K. A, Vertiy A. A. (2011), *Subsurface Sensing, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering*, Wiley-Blackwell.
- Orlando L. (2007), "Georadar Data Collection, Anomaly Shape and Archaeological Interpretation - A Case Study from Central Italy," *Archaeological Prospection*, vol.14, pp.213–335.
- D'Agostino E. (2005), *Da Locri a Gerace. Storia di una diocesi della Calabria bizantina dalle origini al 1480*, Rubbettino Editore, Catanzaro.
- Bhimji S. (2005) "Curvature on Triangle Meshes" School of Computing Science, Simon Fraser University
- Daniels J. D. (2004), "Ground Penetrating Radar 2th", *The Institution of Electrical Engineers*, London.
- Leucci G. (2002), "Ground-penetrating Radar Survey to Map the Location of Buried Structures under Two Churches," *Archaeological Prospection*, vol.9, pp.217–228.
- Rusinkiewicz S., Levoy M. (2001), "Efficient variants of the ICP algorithm", *Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modelling, Quebec City*.
- Besl P.J., McKay N.D. (1992), "A Method for Registration of 3-D Shapes" *IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence*
- Chen Y., Medioni G. (1992), "Object modelling by registration of multiple range images", *Image and Vision Computing*, 10: 145-155.